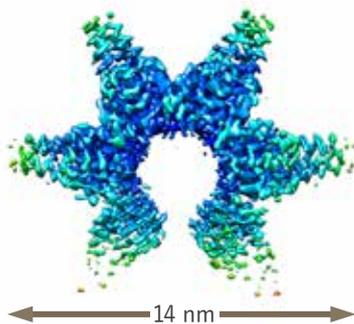




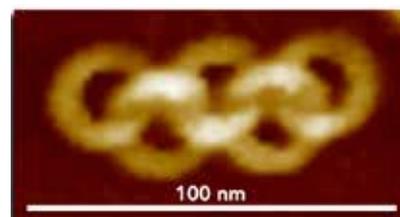
PF BL-10C で実験中の千葉大学大学院
相澤 匠さん(左)と磯辺 篤さん(右)
関連記事は次ページから

僕たちは加速器を通して ナノの世界をみている



タンパク質「RNaseP」
関連記事は 5 ページに

今号には、超分子・ミュオニウム・
タンパク質・エレクトライドなど
が登場します



超分子の鎖「カテナン」
提供：千葉大学 矢貝 史樹 教授

超分子ナノ(メゾ)サイエンスと量子ビーム

途方もなく小さいナノの世界

「ナノ」という言葉は、最近では小さいという意味でも使われるようになりました。ナノは国際単位系(SI)のさまざまな単位の前につける言葉(接頭辞)のひとつで、 10^{-9} を意味し、記号は^{ナノ}nです。1 nmは1 mの10億分の1の長さです。原子1個の大きさはおよそ0.1 nmですから、nmは原子や分子が集まった状態の大きさを表すのに適しています。

物質も生命も原子や分子がたくさん集まってできています。例えば、生物の体は多くのナノサイズの分子から構成されていて、それらがはたらくことで複雑な生命活動が維持されています。そんな自然界についてよく知るために、極小スケールの科学(ナノサイエンス)が進歩し、その結果、より小さく便利なものを作る技術(ナノテクノロジー)が発達しました。

夢の素材

ナノテクノロジーを利用すると、デバイスの「小型・軽量化」だけでなく、それまで存在しなかった新素材を作ることができます。小さな周期的な加工を施すことで画期的な機能を生み出すと言われる**フォトリソグラフィ**や**フォトニック結晶***や**メタマテリアル***などの新素材もその例です。しかし、素材の塊にナノサイズの加工を施すのは技術的にかなり難しいことです。

彫刻のように掘り出すのが難しければ、ブロックのように組み立てることはできないか。逆転の発想による新しいものづくりが始まっています。

誰も指示しなくても勝手に分子や原子が集まって秩序立った構造を作る**自己組織化**という現象があります。生物もタンパク質などを材料にした自己組織化を行っているといえます。千葉大学大学院工学研究科の矢貝 史樹 教授を中心とした研究グループは、自己組織化による**超分子**でナノ部品を作る研

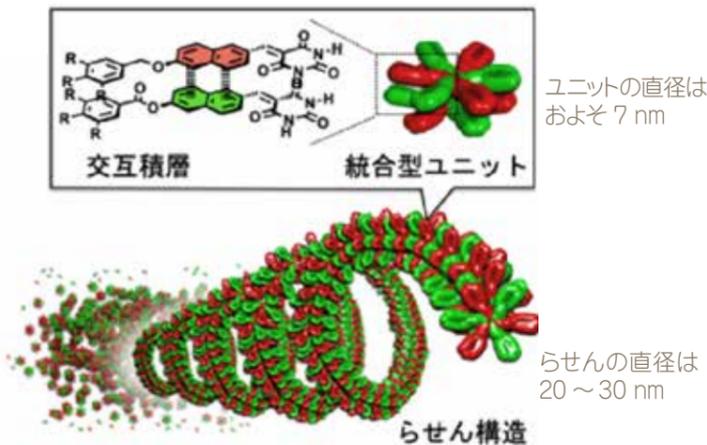
* フォトニック結晶：素材の中に屈折率が異なる物質を光の周期と同じぐらいのサイズで並べたもの。光の進行を自在に制御できる。

* メタマテリアル：自然界ではあり得ない負の屈折率を持つ材料。ナノサイズでコイルの形状を作り、それらを周期的に配置させたもの。

* 超分子の例：シャボン玉・細胞膜・DNA・タンパク質・液晶などなど…

究に取り組んでいます。超分子とは、原子同士が強力な共有結合*で連結するのではなく、**水素結合***や**ファンデルワールス力***のような比較的弱い引力で繋がっている状態を指します。矢貝教授の研究グループは炭素原子(C)6個が環状に結びついた平面状の分子(ベンゼン環)が弱い引力によって連結し、コインを積み上げたように積層する現象に着目しています。これまでに、光の制御で自ららせん状に巻き上がる超分子ポリマーや、らせん構造がほどこけるナノ線維などを開発しました。分解しやすいポリマーなどの開発の糸口となる研究として期待されています。

ナノサイズの基本単位構造(ユニット)が集合することで、ある決まったかたちの超分子が自然に形成され階層的な構造を作ります。ユニットのかたちによって、らせんになったり星形になったり、最終形が異なるので、組み上がりを想定して初めのユニットをデザインします。決まったかたちに集合した超分子ポリマーは、超分子間の弱い相互作用(この場合は引力)により、さらに幾何学的に連結したり絡みあったりして、複合的に集合した「**トポロジカル超分子ポリマー**」を構築します。さらに光などで超分子ポリマーの形態を変化させることもできます。



わずかに異なる赤と緑の2種類の分子を混ぜると分子の小さな集まり(ユニット)ができ、さらにそれが積層していきます。赤と緑とのわずかな違いによって積み重なった最終形はらせんになります。

2020.03.31 千葉大学 KEK プレスリリース「混ぜると自ら伸びる超分子ポリマーの開発に成功 新材料設計に期待」より



* ファンデルワールス力：分子間にはたらく弱い引力
* 水素結合：負に帯電しやすい原子と正に帯電しやすい水素の間にはたらく静電的引力による結合
* 共有結合：原子同士が電子を共有して結びつく結合

小さい分子が集まってスケールが大きく異なる超分子に成長するので、ナノからメゾ(ナノとマイクロの間)、マイクロ(^{マイクロ} μ は 10^{-6} を表す接頭辞)にわたる幅広い空間スケールでの階層構造状態を理解する必要があります。

ナノ・メゾを観察する方法

ナノサイズ・メゾサイズの試料を見る道具として透過型電子顕微鏡などがありますが、多くの場合、観察の前に試料を凍結したり染色するなどの処理を行います。一方、X線や中性子などの量子ビームを利用した散乱法は試料をそのまま測定できます。



利用した散乱法は試料をそのまま測定できます。

散乱とは、物質にビームを当てたときにビームが曲がることを指します。散乱法では、どのくらいの角度に曲がったビームがどのくらい強く観察されるか調べ、試料に含まれる

構造を読み解きます。数 nm から 100 nm 程度のまさにナノサイズ・メゾサイズの情報を得るのが得意な実験手法です。

わずかな違いを読みとるため、ビームを細く絞ったり、信号に対するノイズを減らす必要があります。加速器を用いた強力な量子ビームが活用されます。物構研のフォトンファクトリー(PF)やJ-PARCの物質・生命科学実験施設(MLF)には小角散乱ビームラインが設置されていて、国内外の研究者・技術者がナノ構造体の評価など様々な研究を行っています。



PF BL-10C X線小角散乱ステーションで装置のセットアップをする PF 高木 秀彰 助教

千葉大学の矢貝研究室のメンバーも PF 小角散乱ビームラインのユーザーです。それぞれがデザインした新しい超分子を試すため、PF 実験ホールの中の BL-10C 作業スペースに実験装置を持ち込みます。超分子を作って観察する一連の作業を実験ホール内で行います。

ビームラインを訪ねた日は大学院生3名が実験を行っていて「条件によって分子が勝手に丸まって輪っかができたり、その輪っかが繋がったりしておもしろいですよ」と小さな容器で行う反応実験の様子を見せてくれました。つい覗き込んでしまっていますが、当然ながらナノサイズの輪っかは見えません。

超分子の様子を確認するため、できたての超分子試料を小角散乱の実験装置内に置き、X線を当てる操作をします。その後はコンピュータ上での作業です。そこには加速器を使わなければ見ることができないナノサイエンスの世界に没頭する若き研究者たちの姿がありました。



PF 実験ホール内で試料を作成し観察準備をする千葉大学大学院 高橋 渉さん(2021年2月撮影)

千葉大学 分子集合体化学研究室
研究内容
<http://chem.tf.chiba-u.jp/gacb18/research.html>



(文案：高木 秀彰、構成・レポート：深堀 協子)

ミュオニウム実験に向けた ビームラインの建設

ミュオニウムは、電子とプラスの電荷を持つ正ミュオンが結合し、水素原子のように振るまう粒子です。ミュオンも電子も素粒子なので、複合粒子である陽子を原子核に持つ水素原子よりも電子状態の精密な理論計算ができます。

ミュオニウムの精密分光実験で得られる値を、理論から計算される値と比較することで、人類がどこまで自然を正確に理解できているかが分かります。そのためには大量のミュオニウムを生成して実験する必要があり、ミュオン科学実験施設(MUSE)に各実験エリアの増設が計画されました。

MLF MUSE

Materials and Life Science Experimental Facility
MUSE Science Establishment



ミュオン S2 実験エリア

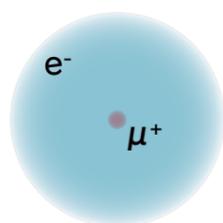
J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) 第1実験ホールにある表面ミュオンビームライン (Sライン) では、既設のビームラインを延長した先に新たな「S2実験エリア」が建設されました。

2021年春の共同利用実験終了後、ビームライン機器の設置やビームの誤出射防止などのためのインターロック機器の試験が行われ、S2実験エリアの工事が完了しました。そして7月16日、S2ラインに初めて調整のためのミュオンビームが届きました。

今後はミュオニウムの精密分光実験に向け、実験装置の整備を進める予定です。

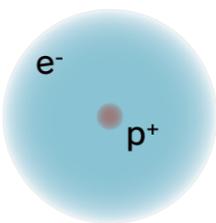


ミュオニウム



μ+: 正ミュオン
(素粒子)

水素原子



e: 電子
(素粒子)
p+: 陽子
(複合粒子)

ミュオン H ライン

同じく MLF 第1実験ホールのミュオンHラインは、ミュオニウムの高精度分光実験など基礎物理実験装置や透過型ミュオン顕微鏡の設置が計画されている大強度ミュオンビームラインです。2012年にビームライン先頭の電磁石を設置したのを皮切りに、徐々に整備が進められ、遂にビームを出す準備が整いました。

Hライン延長部では、透過型ミュオン顕微鏡に加え KEK 素粒子原子核研究所と共同でのミュオン異常磁気能率 (g-2)・電気双極子能率 (EDM) の超精密測定実験も計画されています。

関連した研究成果

2021.04.16 プレスリリース
「理想の水素原子」で未知の物理現象を探索する
ミュオニウムのマイクロ波分光実験がスタート
<https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/04/PR20210416.pdf>



2021.08.10 プレスリリース
逆転の発想『ラビ振動分光』で
ミュオニウム原子を精密に測定
<https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/08/PR20210810.pdf>

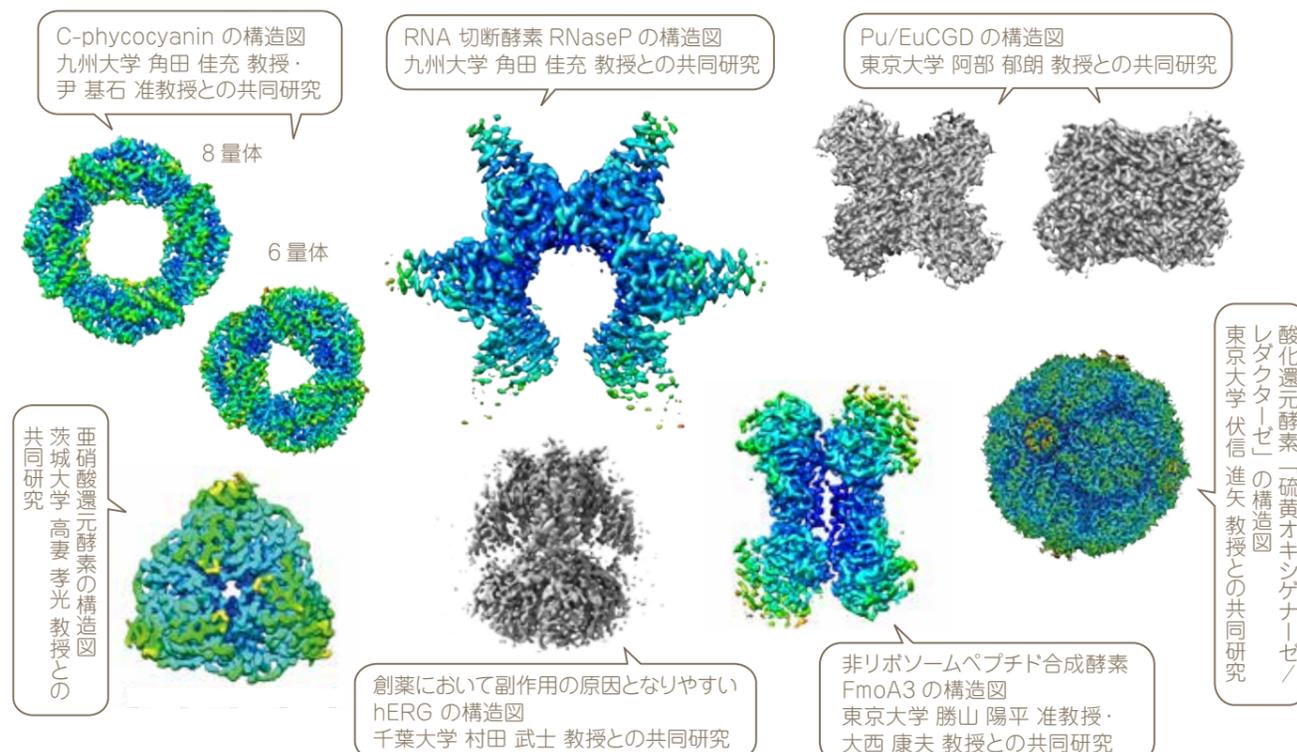


ミュオニウムとミュオジェンとの違いは？
物構研 News No.29 でご紹介したミュオジェンは正ミュオンと電子が作る「元素」の名前です。ミュオジェンの電氣的に中性の状態がミュオニウムです。
<https://www2.kek.jp/imss/news/2019/topics/0920FoolsGold/>

クライオ電子顕微鏡によるタンパク質の単粒子解析成果

タンパク質の構造を調べるためのクライオ電子顕微鏡 (クライオ電顕) が KEK に設置され稼働を開始してから3年半が経過しました。学術機関のみならず企業ユーザーも増えています。

構造生物学研究センター (SBRC) とユーザーの皆さんとの共同研究の成果を図でご紹介します。(カラーの図は局所分解能表示です)



クライオ電子顕微鏡の実験棟を建設中

現在、クライオ電顕は KEKB リングのほぼ中央にある建物に設置されていますが、クライオ電顕専用の建物を建設、移転が計画されています。新棟は構造生物学実験準備棟とフォトンファクトリーの間建設中です。この「クライオ電顕実験棟」にはタンパク質の精製のための実験室も移転し、精製したタンパク質の観察から解析まで行えるようになります。これによって、より質の高い解析が可能になります。また、作業スペースが広がるので不安定な試料を扱いやすくなり、共同利用者にとっても使いやすい環境になります。



クライオ電顕棟建設作業のようす (2021年9月撮影)
右奥に見えるのが構造生物学実験準備棟、左奥は筑波山



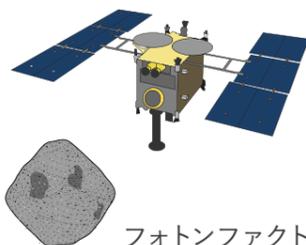
クライオ電顕棟建設予定地 (2021年8月撮影)
直線加速器に沿った銀杏並木が見える



建設作業のようす (2021年10月撮影)
完成予定は2022年春の見込み

一般公開をオンライン開催しました

KEKでは9月4～5日に一般公開をオンライン開催しました。物構研は主に2日目にライブ配信を行いました。ご覧くださったみなさま、ありがとうございました。



講演「X線顕微鏡をつかって、小惑星リュウグウの微粒子から生命の材料をさがす」
藪田 ひかる 教授 (広島大学)

フォトンファクトリー (PF) ユーザーの^{やぶた}藪田ひかる教授が率いる「はやぶさ2」初期分析チーム 固体有機物分析チームの目標は、小惑星リュウグウの微粒子のどこに、どのような種類の有機物が分布しているかを知ることです。宇宙における生命の起源を明らかにすることです。広島大学の研究室から届けられた講演では、小惑星のなりたちについての解説と、隕石に含まれる有機化合物の分析結果に加え、「小惑星が大量に降り注ぎ地球に水や有機物がもたらされた」という仮説が紹介されました。また、「はやぶさ2」のサンプル分析について、PF BL-19AのX線顕微鏡前からの生中継を交えて解説しました。



物構研 リュウグウ試料分析特設サイト
<https://www2.kek.jp/imss/news/hayabusa2/>

KEK 一般公開 2021 のアーカイブ動画は、YouTube KEK チャンネルで公開中です。

ライブ配信中には YouTube およびニコニコ生放送に多数のコメントが寄せられました。そこで今年度の物構研特設サイトに Q & A コーナーを設けました。



4種のビームでみる!
～放射光・低速陽電子・中性子・
ミュオンの実験施設から中継～

PF 実験ホール内に設けた物構研のスタジオから量子ビーム連携研究センター (CIQuS) の^{サイキユース}雨宮^{あめみや}健太^{けんた}センター長と^{おおした ひろみ}天下^{ひろみ}宏美^{ひろみ}博士研究員が、物構研の4種の量子ビームとCIQuSを紹介しました。数多くの研究対象の中から、燃料電池の材料とエレクトライドと呼ばれる物質を取り上げました。

まず燃料電池に用いられる高分子材料「ナフィオン」について、これまで中性子を用いた研究を行ってきたCIQuSの^{やまだ のりふみ}山田^{のりふみ}悟史^{ごし}准教授が、放射光の軟X線や低速陽電子を組み合わせた研究計画を紹介しました。低速陽電子の実験施設は一般公開では今回初めて紹介されました。

また、CIQuS プロジェクトリーダーのひとりである^{かどの りょうすけ}門野^{りょうすけ}良典^{りょうすけ}教授は、放射光とミュオンを使って共同研究が行なわれた「エレクトライド」について紹介しました。

(エレクトライドは未来の材料。次ページにて解説します。)

物構研一般公開 2021 特設サイト
<https://www2.kek.jp/imss/news/2021/topics/openhouse/>



エレクトライドとは...

解説：物構研 ミュオン科学研究系
門野 良典 教授



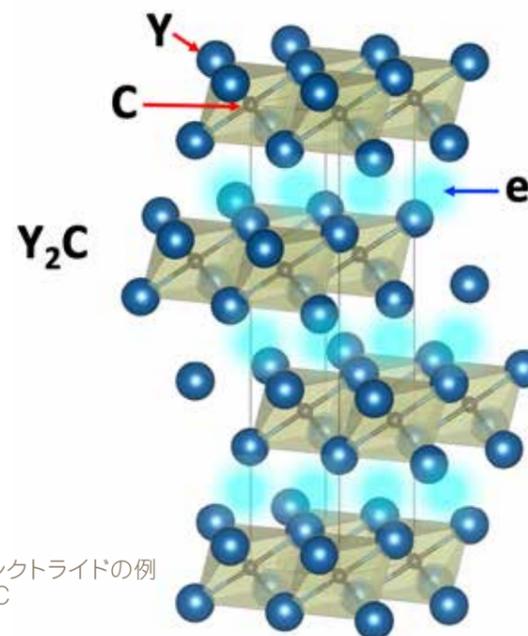
元素は周期表上で炭素 (C)、ケイ素 (Si) などを含む第14族 (下図の黄色の列) より左に行くほど正イオンになりやすく、安定な第18族を除いて右に行くほど負イオンになりやすいという性質を持っています。複数の元素からなる物質では、その性質に従って原子の間で電子のやりとりが起こり、周期表の左寄りの原子は正イオン、右寄りの原子は負イオンの状態を取ります。また、このような電子のやり取りは化学結合の源で、これによって安定な物質が形成されるとともに、電気を流さない状態 (絶縁体) になります。

では、例えば周期表上で第14族の元素と、第3～11族の遷移金属と呼ばれる元素 (下図の水色) を組み合わせると何が起きるのでしょうか? 遷移金属元素は左にあるため正イオンになりやすいだけでなく、d軌道*と呼ばれる電子殻にある電子を最大7～8個程度放出することができます。一方、第14族の元素では電子は4個までしか出入りできません。そこで、これらの元素の組み合わせでできた物質では、余った電子を保持できるような原子サイズの隙間ができ、そこで電子が負イオンの代役を務めています。そのような隙間にある電子をエレクトライド電子と呼び、それを持つ物質をエレクトライド (電子化物) と呼んでいます。

*d軌道：原子のなかで電子が占める席を電子軌道、その集まりを電子殻と呼びます。電子軌道はエネルギーが低い順にs軌道、p軌道、d軌道と呼ばれ、d軌道はdiffuse (発散・拡散) の頭文字から名付けられました。

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	↓	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	↓	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

元素の周期表 (物構研オリジナルネコイヌ周期表)



エレクトライドの例
Y₂C

例えばイットリウム (Y) と炭素からなる物質 Y₂C では、C と Y からなる四面体の層状構造の隙間にエレクトライド電子が二次元的に広がった状態になります。エレクトライド電子は、原子核に束縛されず格子間を漂っているので電気を運ぶことができます。つまりエレクトライドは金属になります。

また、エレクトライド電子はアルカリ金属と同じように物質の表面から出入りしやすい (仕事関数が小さい) 一方で、エレクトライド自体は大気中でも比較的安定という特徴を持ち、発光ダイオードの電子注入層やアンモニア触媒材料などへの応用が進められています。



KEK は 2021 年 4 月、創立 50 周年を迎えました

KEK50周年記念事業特設サイト <https://www2.kek.jp/kek50/>



記念植樹

春の科学技術週間に記念植樹された樹々です。



↑メンデルのぶどう
←ニュートンのりんごの木

記念シンポジウム

2日間にわたり KEK つくばキャンパスから
動画配信されました。



シンポジウム冒頭の機構長挨拶のようす
2021年11月9日 KEK 小林ホールにて

量子ビームサイエンスフェスタをオンライン開催します

2021 年度量子ビームサイエンスフェスタ
第 13 回 MLF シンポジウム・第 39 回 PF シンポジウム

2022 年 3 月 7 日(月)～9 日(水)

詳しい最新情報は特設ページでご確認ください。

<https://mlfinfo.jp/sp/qbs-festa/2021/>

お問い合わせ：qbsf2021-office@ml.j-parc.jp



参加・要旨登録受付中
登録締切は 1 月 31 日です



物構研ロゴ商標登録のお知らせ

高エネルギー加速器研究機構は、物構研 (IMSS) ロゴマークの商標登録出願を行い、7 月 27 日、特許庁より 9 区分について商標登録されました。

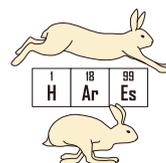
物構研のロゴマークは 4 種の量子ビーム(放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子) がモチーフになっています。中央に集まっているようにも外に広がっているようにも見えるデザインは、知を集約し、物質の構造を解明し、その情報を社会に発信する、という物構研のミッションを表現しています。

オリジナルグッズの 特別販売を行っています

物構研では科学をデザインしたオリジナルグッズを制作しています。不定期で受注販売も行われています。物構研ウェブサイト、物構研 facebook、PF Twitter などのご案内します。



IMSS Facebook



PF Twitter



編集：物構研 広報室 (雨宮 健太、安達 成彦、市村 規子、入江 敦子、岩野 薫、宇佐美 徳子、大島 寛子、北村 未歩、瀬戸 秀紀、瀬谷 智洋、中村 惇平、深堀 協子、山田 悟史、和田 健)

発行：高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1 TEL: 029-864-5602
<https://www2.kek.jp/imss/> e-mail: imss-pr@ml.post.kek.jp (物構研 広報室)
禁無断転載 ©All rights reserved by High Energy Accelerator Research Organization (KEK)



IMSS web